

Die Hydrothermalsysteme des Axial Seamount

Tracerausbreitung und Mineralpräzipitate im Bereich des Juan-de-Fuca-Rückens; Forschungsarbeiten mit FS Sonne und dem kanadischen Tiefseeroboter ROPOS im Nordost-Pazifik

Abstract

Axial Seamount is the dominant volcanic feature of the Juan de Fuca Ridge and host to several important active hydrothermal fields. Cruise SO-109 of R/V Sonne was designed to characterize the detailed relationships between recent volcanic and tectonic events and hydrothermal fluxes in the vicinity of Axial Seamount for comparison with other sources of tracers within the Juan de Fuca Plate (e. g., Cascadia Margin). A major objective of the cruise was to characterize and map the distribution of chemical tracers in an attempt to quantify hydrothermal discharge which included the study of hydrothermal precipitates and the process of boiling of hydrothermal fluids – a rare phenomena in hydrothermal fields at the modern seafloor. This collaborative German-Canadian-US project led to the first deployment and testing of Canada's deep submergence vehicle ROPOS from a German vessel. ROPOS was successfully used to collect a unique suite of sulfide-sulfate precipitates from the actively boiling Inferno Vent in the ASHES Vent Field of Axial Seamount and provided state-of-the-art video documentation of the boiling process.

1 Einführung

Ein wichtiger Aspekt marin-geowissenschaftlicher Grundlagenforschung ist die systematische Untersuchung submariner Quellsysteme. Dies geschieht vorrangig im Hinblick auf die Ermittlung verlässlicher Basisdaten, die langfristig als Grundlage für eine

Quantifizierung und Bilanzierung von Stoffaustauschprozessen zwischen ozeanischer Kruste, Sedimenten und Meerwasser dienen sollen.

Übergeordnetes Ziel der For-

schungsvorhaben HYDROTRACE (Sonne-Fahrt 109) und SORO (Sonne-Fahrt 110) war die exemplarische Untersuchung des Stoffeintrages aus marinen Quellsystemen an Rift- und

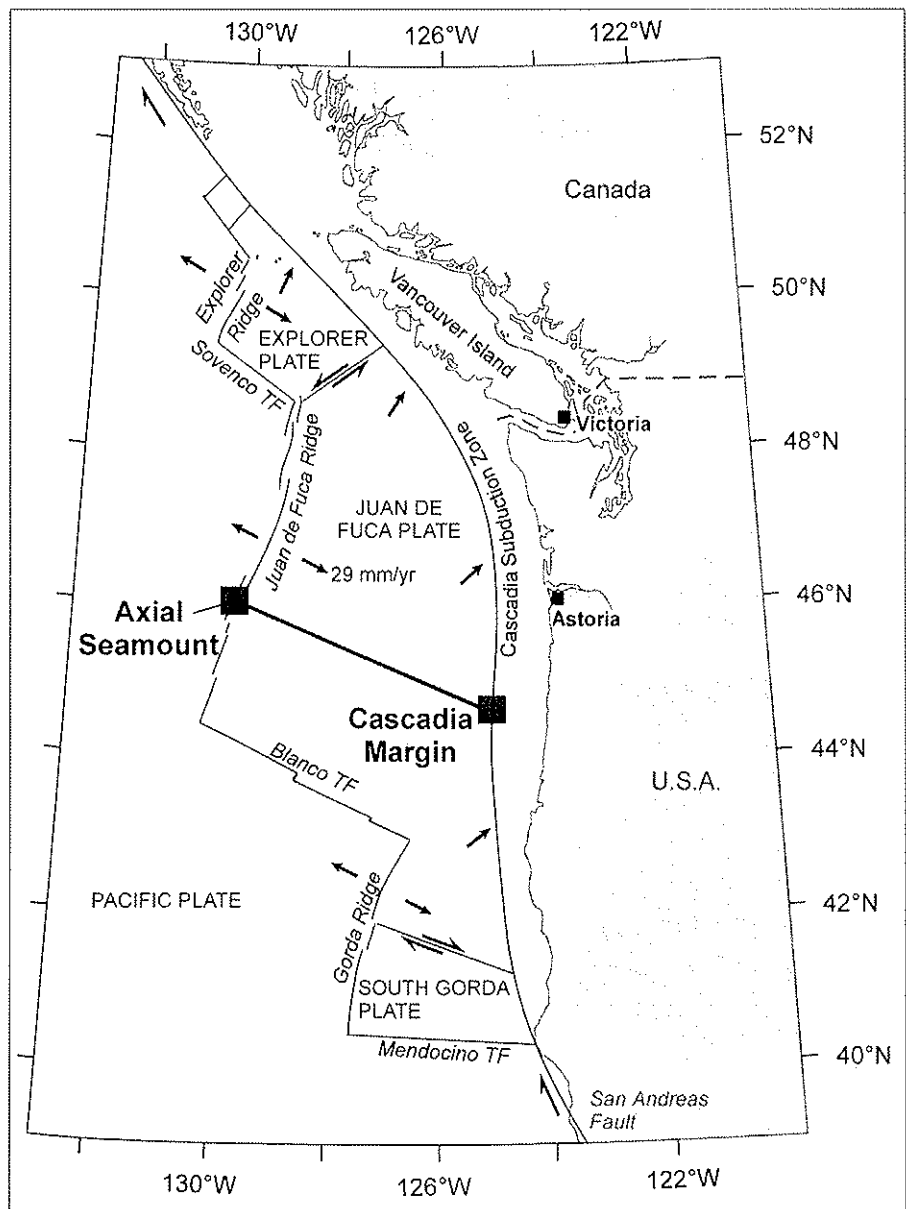


Abb. 1. Lage der Untersuchungsgebiete Axial Seamount (Sonne-Fahrt 109) und Cascadia Margin (Sonne-Fahrt 110) an der divergierenden bzw. konvergierenden Grenze der Juan-de-Fuca-Platte im Nordost-Pazifik.

* weitere Autoren: Mark Hannington, Jan Jonasson, Robert Embley, Gary Massoth, Dave Butterfield, Bill Chadwick, Verena Tunnicliffe, Harry Elderfield, Gary Klinkhammer, Ko-ichi Nakamura, Mike Perfit, Melanie Summit, Keith Shepherd, Stephan Lammers, Reinhold Bayer, Klaus-Peter Becker, Sven Petersen, Peter Buchholz, Thomas Seifert, Ulrich Schwarzschaemper, Stephan Uhlig, Heike Preißler, Thomas Kuhn

Subduktionszonen im Hinblick auf ihre Bedeutung für den Stoffhaushalt der Ozeane. Als Untersuchungsgebiet wurde zunächst die Juan-de-Fuca-Platte im Nordost-Pazifik ausgewählt, da hier die beiden zu untersuchenden Quelltypen räumlich relativ nahe beieinander liegen. Die Untersuchungen konzentrierten sich zum einen auf den Axial Seamount am Juan-de-Fuca-Rücken als Typlokation für heiße Hydrothermalquellen (*black smoker*) sowie andererseits die bekannten *cold seeps* des Akkretionskeils der Cascadia Subduktionszone (Abbildung 1). Sowohl im proximalen als auch im distalen Bereich der Quellaustritte sollten, basierend auf der Identifizierung geeigneter Tracer (CH_4 , $^3\text{He}/^4\text{He}$, H_2S , Mn, Fe, Cu, Zn u. a.), deren Verteilungsmuster sowie die Kennzeichen der assoziierten Mineralpräzipitate und Faunengemeinschaften untersucht werden.

Im Rahmen der Forschungsfahrt HYDROTRACE wurden in einem ersten Schritt die Hydrothermalsysteme in der Caldera des Axial Seamount mit Hilfe von FS Sonne untersucht [1, 2]. In diesem Zusammenhang konnte, neben tiefgeschleppten chemischen Scannern, erstmals ein ferngesteuerter Tiefseeroboter („ROPOS“) von einem deutschen Forschungsschiff aus zur Erkundung und Beprobung des Meeresbodens eingesetzt werden. Das ROPOS-System (Remotely Operated Platform for Ocean Sciences) wurde von den kanadischen Projektpartnern (Geological Survey of Canada) für das Unternehmen „Axial Seamount“ im Rah-

men der Vereinbarungen zur wissenschaftlichen und technischen Zusammenarbeit (WTZ) zwischen Kanada und der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung gestellt. Zur logistischen Unterstützung der ROPOS-Einsätze waren darüber hinaus Mitarbeiter der US-Meeresforschungsorganisation NOAA aus Seattle und Newport an der HYDROTRACE-Kampagne beteiligt.

2 Axial Seamount

Axial Seamount ist die dominierende vulkanische Struktur des Juan-de-Fuca-Rückens und befindet sich bei etwa 46° nördlicher Breite im Nordost-Pazifik, etwa 300 km südwestlich von Vancouver Island (Abbildung 1). Es handelt sich um eine 1750 km^3 großen Schildvulkan, der sich wahrscheinlich über einem „hot spot“-Bereich gebildet hat. Aufgrund der West-Migration des Juan de Fuca Rückens befindet sich der ehemals westlich der Rückenachse gelegene hot spot heute direkt unterhalb der Rückenachse, mit Axial Seamount als jüngster Bildung. Axial Seamount repräsentiert damit das aktive Ende der Cobb-Eickelberg-Seamount-Kette und markiert deren Kreuzungspunkt mit dem Juan-de-Fuca-Rücken bei $46^\circ 58' \text{ N}$, $130^\circ 00' \text{ W}$. Axial Seamount wird damit sowohl von den vulkanischen Ereignissen der Seamount-Kette als auch dem *seafloor spreading* des Juan-de-Fuca-Rückens beeinflusst [3].

In den Jahren 1986 und 1993 war Axial Seamount die Lokation von Megaplume-Ereignissen, die die engen Zusammenhänge zwischen Tektonik,

Vulkanismus und hydrothormaler Aktivität verdeutlichen. Der letzte Megaplume-Austritt im Sommer 1996, der zur Etablierung von neuen Hydrothermalfeldern und dem Nachweis einer bisher in ihren Dimensionen unterschätzten Biosphäre in den ersten Zehnermetern unterhalb des Meeresbodens führte („subsurface biosphere“), stand mit einer seismisch über 60 km zu verfolgenden Gangintrusion in Zusammenhang, die, ausgehend von der nördlichen Caldera-Begrenzung, die ozeanische Kruste reißverschlussartig nach Norden hin aufgerissen hat [4].

Axial Seamount erhebt sich auf einer in 2100 m Wassertiefe gelegenen Basisfläche von zirka 50 u 70 km etwa 600 m über den umgebenden Meeresboden und besitzt eine cirka 24 km^2 ($3 \times 8 \text{ km}$) große Gipfel-Caldera in 1470 m Wassertiefe (Abbildung 2). Die Caldera wird von 60–80 m hohen vertikalen Einbruchswänden begrenzt. Die nur etwa 3° geneigte, wenig strukturierte Sohle ($< 5 \text{ m}$ Relief) bei etwa 1530 m ist mit frischen basaltischen Schichtlaven bedeckt und aufgrund der anhaltenden Divergenz des Juan-de-Fuca-Rückens (Spreizungshalbrate $2,9 \text{ cm/Jahr}$) durch eine Vielzahl von N-S verlaufenden Störungszonen, vor allem im Bereich der nördlichen Wand und Flanke der Caldera, gekennzeichnet. Innerhalb der Caldera setzen sich diese Zonen in Form einer jungen, über fast 300 m nach Süden zu verfolgenden Förderspalte mit bis zu 30 m weiten und 25 m tiefen Kollapsstrukturen fort [3].

3 Hydrothermalfelder CASM und ASHES

Rezente und fossile hydrothermale Aktivität im Bereich von Axial Seamount ist fast ausschließlich an die N-S verlaufende, nicht mehr vulkanisch aktive Störungszone innerhalb der Caldera gebunden und umfasst nach dem Kenntnisstand von 1993: (1) „black smoker“ mit Austrittstemperaturen von 280°C bis über 300°C im direkten Kreuzungsbereich der südlichen Caldera-Wand mit der Caldera-Sohle (ASHES-Hydrothermalfeld, Abbildung 3), (2) niedriger temperierte (maximal 100°C) Lösungsaustritte im Bereich von Kollapsstrukturen nahe (200 m) der nördlichen Caldera-Wand sowie inaktive bzw. niedrig-temperierte ($< 35^\circ \text{C}$) Baryt-Sulfidschlote 40 m weiter östlich (CASM-Hydrothermalfeld, Abbildung 3) [3]. Die Austrittstempe-

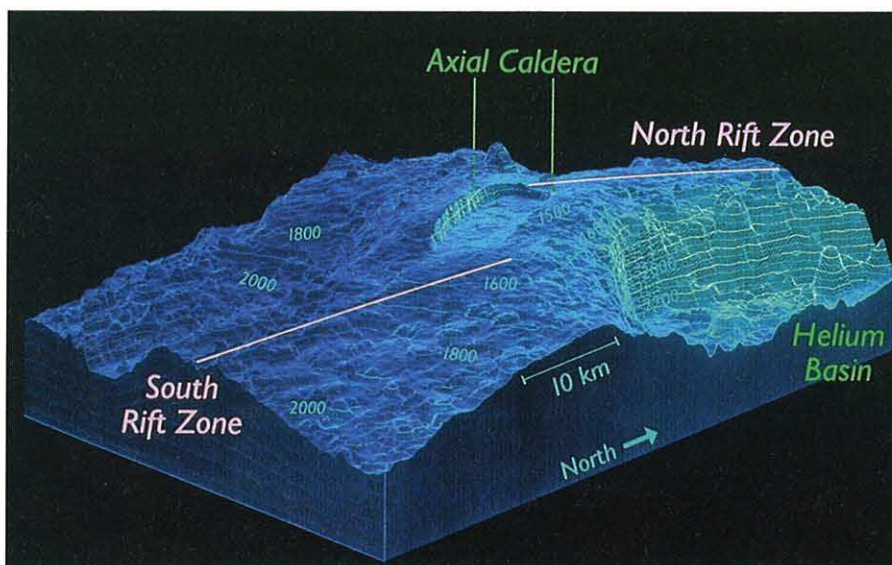


Abb. 2. Dreidimensionale Darstellung des Axial Seamount mit der 24 km^2 großen Gipfel-caldera zwischen der nördlichen und südlichen Fortsetzung des Juan-de-Fuca-Rückens.

raturen der *black smoker* des ASHES-Hydrothermalfeldes wurden im Detail mit 283 °C (Hillock Vent), 301 °C (Hell Vent), 323 °C (Mushroom Vent) und 328 °C (Inferno Vent) bestimmt [5]. Zwei weitere Schloten (Virgin Mound und Crack Vent) bestehen überwiegend aus Anhydrit; die Fluidtemperaturen betragen hier 299 °C bzw. 217 °C [5]. Während der letzten ALVIN-Tauchkampagne im Bereich des Axial Seamount wurden 1995 deutliche Temperaturerhöhungen der austretenden Fluide gegenüber der letzten Messung festgestellt.

Aufgrund des guten Vorerkundungsgrades durch amerikanische und kanadische Gruppen, die seit 1996 Zeitserienmessungen und -beprobungen im Bereich des Axial Seamounts durchgeführt haben, war diese Region für die von uns geplanten Forschungsarbeiten besonders gut geeignet. Die wissenschaftlichen Teilziele für das Arbeitsgebiet Axial Seamount umfaßten im Hinblick auf das Leitthema des HYDROTRACE-Vorhabens (1) die genaue Untersuchung der Fluid- und Partikelemission im proximalen und distalen Bereich hochtemperierter Punktquellen, (2) die Untersuchung der zeitlichen Varianz der physiko-chemischen Fluidparameter und der Entwicklung der Hydrothermalpräzipitate und (3) die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen tektonischer, vulkanischer und hydrothormaler Aktivität.

4 Ergebnisse

4.1 Bathymetrie

Als Basis für Detailuntersuchungen mit FS Sonne und ROPOS wurden unter Ausnutzung der Verfügbarkeit von Differential-GPS (Navigationsgenauigkeit im 10-Meter-Bereich) zunächst mit 53 Hydrosweep-Profilen zwei hochauflösende bathymetrische Karten des Axial Seamount erstellt (Maßstab 1:75 000 und 1:25 000, jeweils 5 m Tiefenlinienabstand). Diese Kartenblätter wurden bereits 2 Monate nach Fahrtende unter gemeinsamer Autorenschaft der beteiligten Institutionen als Open File Report des Geological Survey of Canada publiziert und sind damit allgemein verfügbar [6].

4.2 Sediment-Untersuchungen

Zur Bestimmung der Gradienten hydrothormaler Einträge in das Sediment bzw. zur Rekonstruktion der Zirkulationsverhältnisse im off-axialen Bereich

des Juan-de-Fuca-Rückens sind Kastengreifer- und Kastenlot-Proben aus bathymetrischen Depressionen im Umfeld des Axial Seamount (Helium Basin) sowie auf einer etwa 90 sm langen Südstraverse ausgehend von Axial Seamount in Richtung auf den Cascadia Margin entnommen worden. Die Analyse der Sedimente auf Schwermetalle und ventspezifische Spurenelemente dauert zur Zeit noch an. Bei Vorliegen der Daten werden diese dann einer Faktorenanalyse sowie anderen Auswerteverfahren unterzogen.

Die ersten Ergebnisse der Porenwasseruntersuchungen der off-axialen

Sedimente lassen aber bereits interessante Zusammenhänge erkennen. So kann deutlich zwischen Sedimentkernen mit gleichförmiger Mg-Verteilung entsprechend der Meerwasserkonzentration (etwa 1270 ppm Mg) und Kernen mit zur Tiefe hin abnehmenden Mg-Konzentrationen unterschieden werden. Dieser abnehmende Gradient in der Mg-Verteilung deutet darauf hin, daß an diesen Stellen Mg-verarmte und im Extremfall Mg-freie Hydrothermallösungen an der Basalt/Sediment-Grenzfläche austreten und diffusiv durch die Sedimente aufströmen.

Das Gesamtbild der Mg-Verteilung in den Sedimentkernen läßt erkennen,

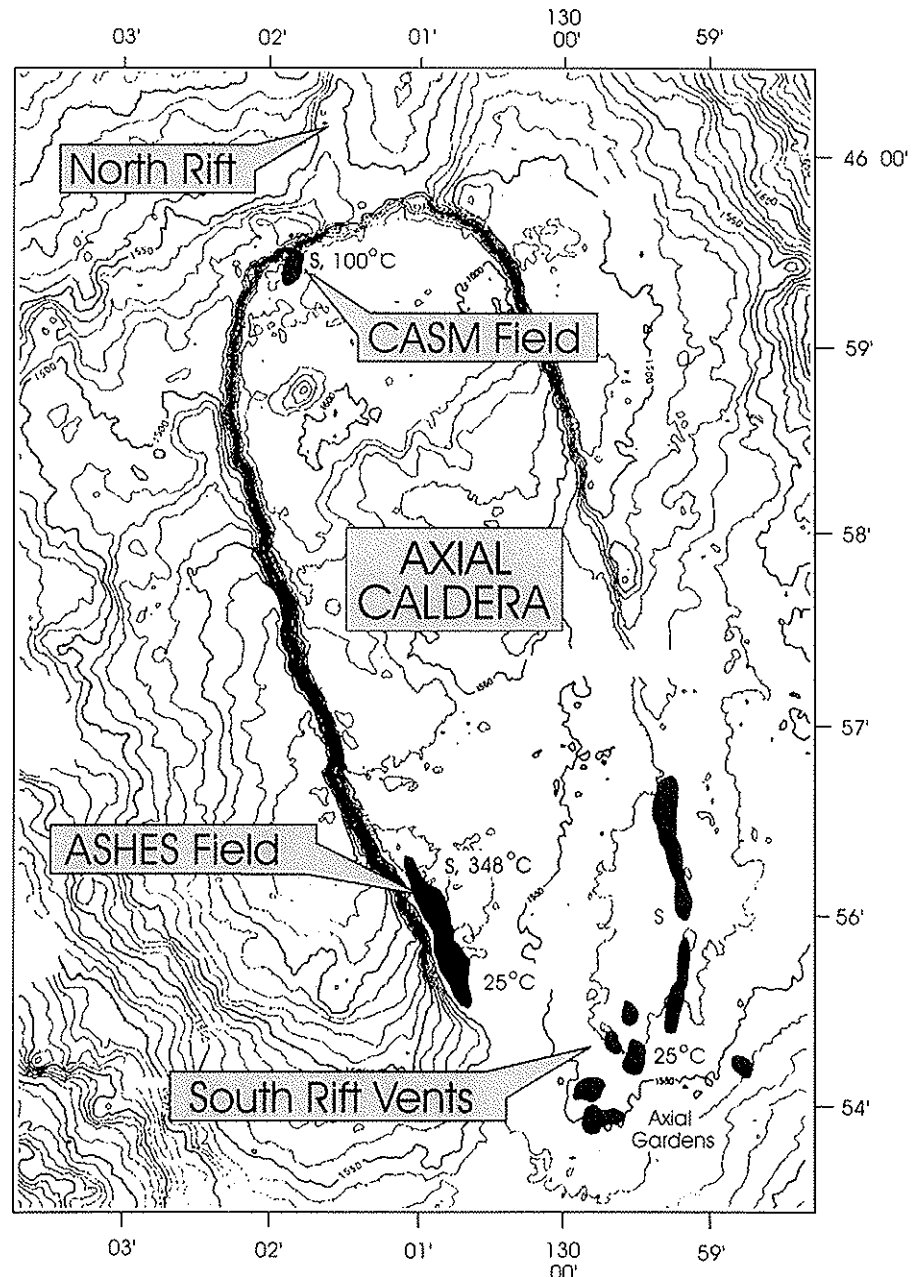


Abb. 3. Lage der Hydrothermalfelder CASM und ASHES im nördlichen und südlichen Bereich der Caldera des Axial Seamount. Zusätzlich dargestellt ist die Position der South Rift Vents mit den Axial Gardens.

dass es im off-axialen Bereich sowohl Aufstrom- (*discharge*) als auch Abstromregionen (*recharge*) gibt. Ähnliche Untersuchungen und damit verbundene Quantifizierungen an anderen Riftzonen haben in der Vergangenheit angedeutet, dass der diffuse off-axiale Austritt niedrigkonzentrierter Hydrothermallösungen volumenmäßig um ein Vielfaches höher ist als der fokussierte Austritt von Hydrothermalen im Bereich der Riftzone selbst. Von der Gesamtauswertung des Probenmaterials werden weitere wichtige Daten zur Verifizierung dieser Konzepte erwartet.

4.3 Plume-Kartierung

Zur Erfassung und Kartierung der Methanverteilung in der Wassersäule wurden innerhalb und außerhalb der Caldera des Axial Seamount insgesamt 24 CTD-Stationen mit jeweils 12 Wasserschöpfern (10 L) gefahren. Unter Ausnutzung des für die ROPOS-Einsätze installierten Transpondersystems ist es gelungen, einzelne CTD's in den direkten Bereich der hydrothermalen Austrittsstellen des ASHES-Hydrothermalfeldes zu navigieren und dort relativ hochkonzentrierte Hydrothermalfluide zu beproben. Bereits an Bord

wurden die Methan-Konzentrationen von fast 300 Einzelproben bestimmt. Bei Maximalwerten von fast 700 nL/L CH_4 ließ sich die hydrothermale Austrittswolke in Übereinstimmung mit allen anderen Systemen und Sensoren (Lichttrübung, Partikeldichte, Potentialtemperatur) ab etwa 30 m über Grund eindeutig erfassen, wobei deutlich wurde, dass die Plume räumlich stark begrenzt ist und eine vertikale Mächtigkeit von nur etwa 40 m aufweist. Die maximalen Potentialtemperaturanomalien betrugen 0,4 °C. Die Auswertung aller Daten lässt eine detaillierte dreidimensionale Kartierung der Methanverteilung im Nah- und Fernfeld der Hydrothermalquellen des Axial Seamounts erwarten (Abbildung 4), wobei insgesamt festzustellen ist, dass die maximalen Methankonzentrationen nur einen Bruchteil der im Bereich der Cascadia-Subduktionszone gemessenen Werte ausmachen.

Zur genaueren Erfassung der Hydrothermalwolke wurden erfolgreich zwei unterschiedliche tiefgeschleppte Systeme eingesetzt, die im Idealfall eine online-Übermittlung von plumespezifischen Daten erlauben. Zum einen handelt es sich um den ZAPS-Scanner der Oregon State University,

der neben Mn (TDM = *total dissolvable manganese*) auch Potentialtemperatur und Partikeldichte bzw. Lichttrübung erfasst. Der ZAPS-Scanner ist aufgrund seiner Empfindlichkeit (0,2 nmol/L TDM) für die Kartierung und Exploration im distalen Bereich von Hydrothermalfeldern geeignet. Beispiele für die Plume-Erfassung mittels Potentialtemperatur und Partikeldichte sind in Abbildung 5 dargestellt.

Der SUAVE-Scanner (*Submersible System Used to Assess Vented Emissions*) von NOAA Seattle ist im wesentlichen für die Bestimmung von Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn (TDM), H_2S zusammen mit der Erfassung von Potentialtemperatur, Leitfähigkeit, Partikeldichte und Lichttrübung ausgerüstet. Es handelt sich um ein Multiplattformgerät, das bisher im online-Betrieb sowohl von den Tieftauchbooten Alvin und Nautilus, als auch von ROPOS eingesetzt wurde. Während der Untersuchungen am Axial Seamount wurde SUAVE zusammen mit dem EXPLOS-Fotoschlitten des FS Sonne im offline-Betrieb benutzt (Abbildung 6), d. h. die Daten wurden im Gerät selbst erfasst und nach Einsatzende über eine externe Schnittstelle von einem portablen Computer zur Auswertung übernommen. Die hydrothermale Austrittswolke wurde sowohl durch Mn als auch H_2S jeweils in Kombination mit der Potentialtemperatur nachgewiesen (Abbildung 7). Die Nachweisgrenzen betrugen für 35 nmol/L für Fe, 20 nmol/L für Mn und 40 nmol/L für H_2S .

Ein im Hinblick auf die Plume-Kartierung bemerkenswertes Ergebnis wurde während eines Einsatzes des Eh-Meters des Geological Survey of Japan erzielt. Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass Minima in der Eh-Kurve eindeutig mit Maxima in der Potentialtemperaturkurve zu korrelieren sind (Abbildung 8). Hieraus ergibt sich eine neue Methode der Kartierung hydrothermaler Quellaustritte.

4.4 Mineralpräzipitate

Die Beprobung der hydrothermalen Präzipitate des CASM- und ASHES-Feldes erfolgte sowohl mit Hilfe des fernsehkontrollierten Greifers des FS Sonne als auch mit dem ROPOS-System. Aus dem CASM-Feld wurden neben Bruchstücken von Baryt-Chimneys auch eine Reihe von Schichtlaven geborgen, die auf ihrer Unterseite umfangreiche Sulfidmineralisation aufweisen, wobei die Oberseite von Fe-

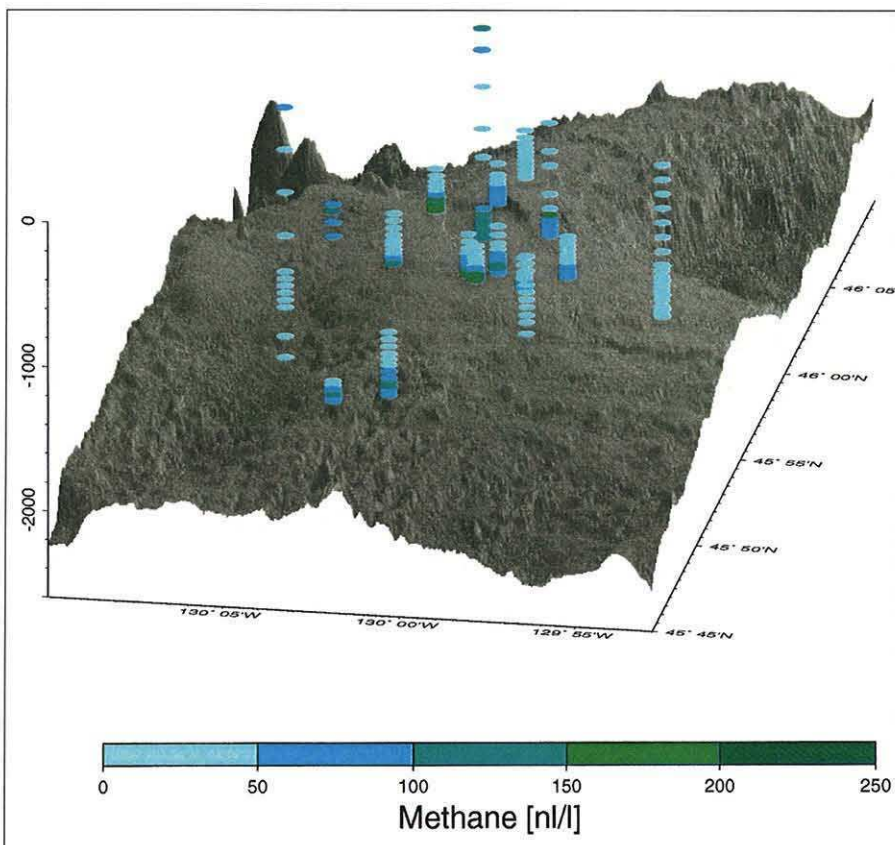


Abb. 4. Räumliche Darstellung der Methan-Verteilung (in nL/L) in und im Umkreis der Caldera des Axial Seamounts.

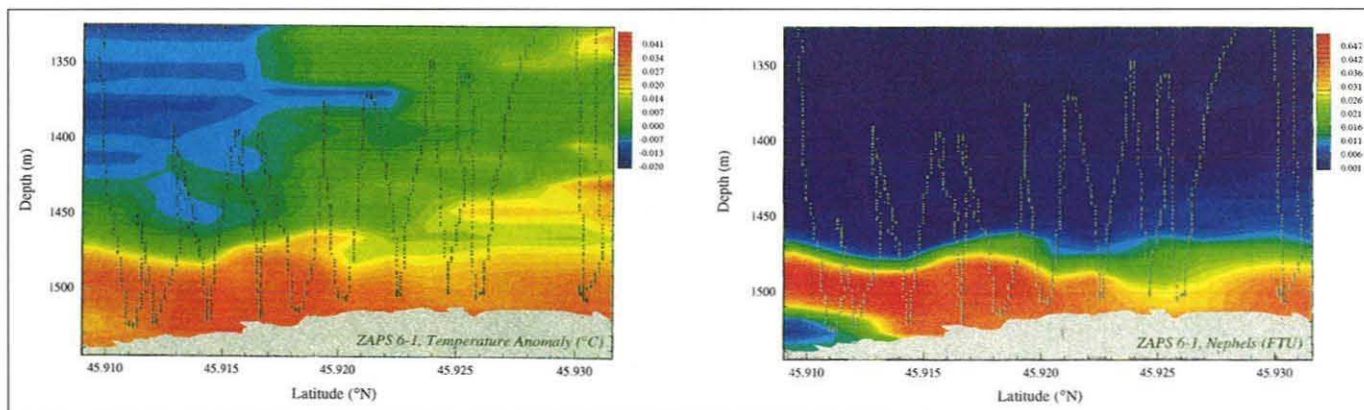


Abb. 5. Darstellung einer „Tow-Jo“-Traverse mit dem chemischen Scanner ZAPS im Bereich des ASHES-Hydrothermalfeldes. Deutlich lassen sich Anomalien in der Potentialtemperatur (a) mit Anomalien der Partikeldichte (b) korrelieren.

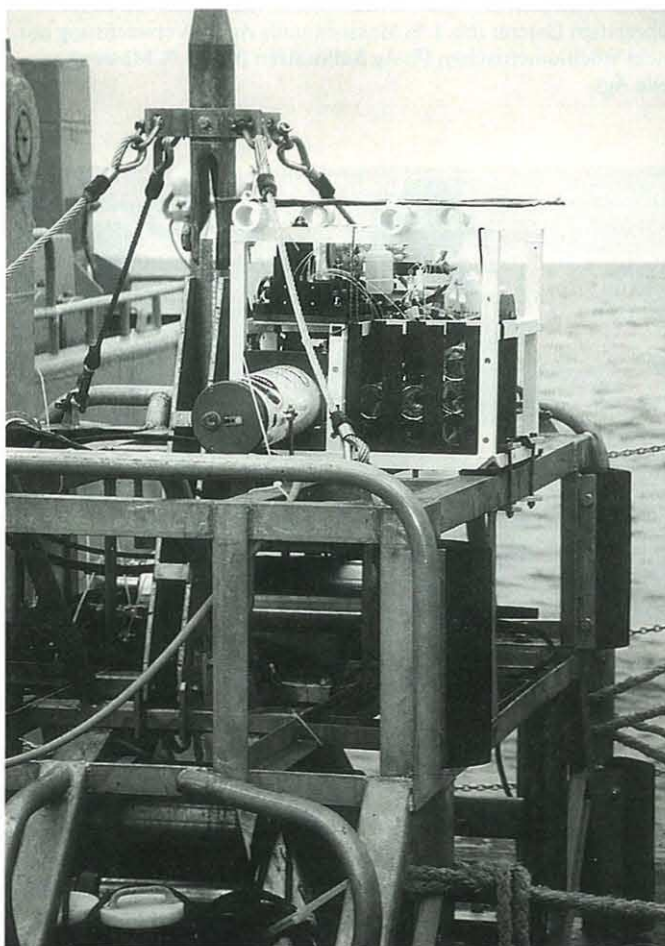


Abb. 6. Position des SUAVE-Scanners zur Erfassung hydrothermaler Austrittswolken auf dem EXPLOS-Fotoschlitten des FS Sonne.

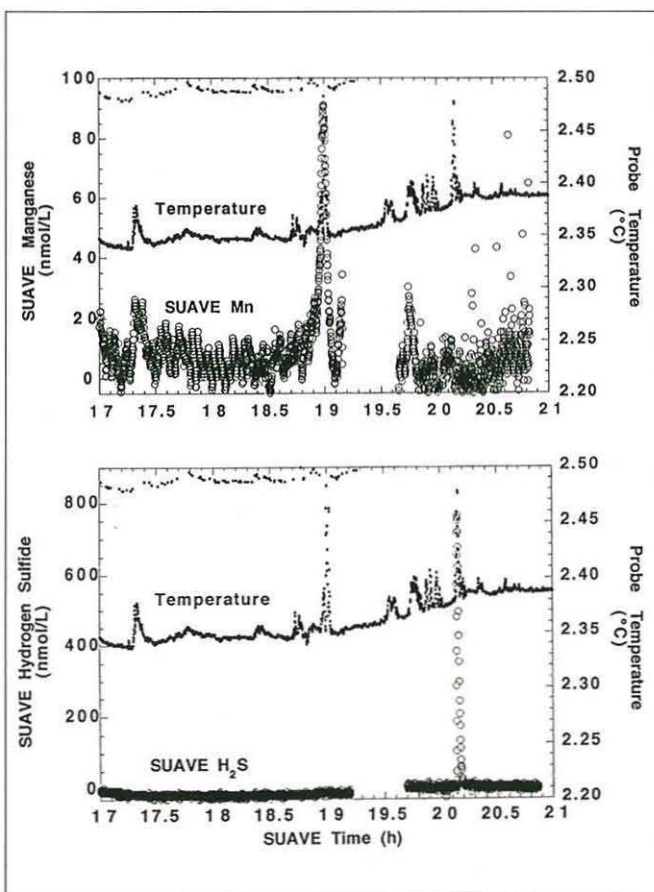


Abb. 7. Korrelationen der Potentialtemperatur mit der (a) Mn- und (b) H₂S-Verteilung in der hydrothermalen Austrittswolke des ASHES-Hydrothermalfeldes. Die Daten sind mit dem tiefgeschleppten chemischen Scanner SUAVE ermittelt worden, der für die Kartierung hydrothermalen Emissionen eingesetzt wurde.

Oxihydroxiden sowie Mn-Oxiden überkrustet und mit Röhrenwürmern bewachsen ist. Das Auftreten von Sphalerit-Galenit-Chalkopyrit-Vererzung auf der Schichtlava-Unterseite sowie die geologischen Informationen über diese Lokation deuten darauf hin, dass es sich um ein mächtiges Schichtlava-Paket handelt, in dessen Hohlräumen sich hydrothermale Lö-

sungen horizontal ausdehnen und quasi wie in einem hydrothermalen Aquifer fließen. Aufgrund der Löslichkeiten von Pb, Zn und Cu lassen sich, basierend auf den angetroffenen Mineralpräzipitaten, Lösungstemperaturen von etwa 180–300 °C (Galenit, Sphalerit) sowie L 300 °C (Chalkopyrit) rekonstruieren, was auf Fluktuationen im Temperaturregime hindeutet.

Von besonderem Interesse ist, dass der Galenit (Abbildung 9) die stöchiometrisch maximal mögliche Konzentration an Silber führt (1 % Massenanteil) und darüber hinaus mit einem nicht-stöchiometrischen Pb-Ag-Sulfosalz verwachsen ist, in dem bis zu 14 % Massenanteile an Silber nachgewiesen wurden. Mit der genauen mineralogischen, mikroanalytischen und

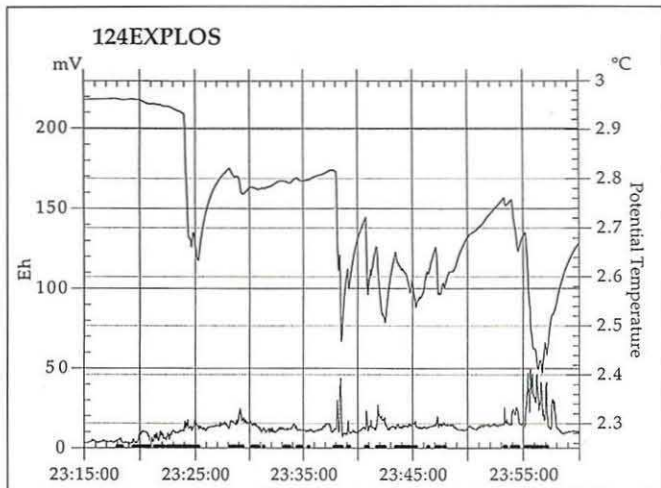


Abb. 8. Beispiel der Korrelation der Eh-Werte (Minima) der hydrothermalen Austrittswolke des ASHES-Feldes mit Anomalien in der Potentialtemperatur (Maxima). Die Registrierung von Eh/T-Werten eröffnet eine neue Methode zur Kartierung von hydrothermalen Plumes.

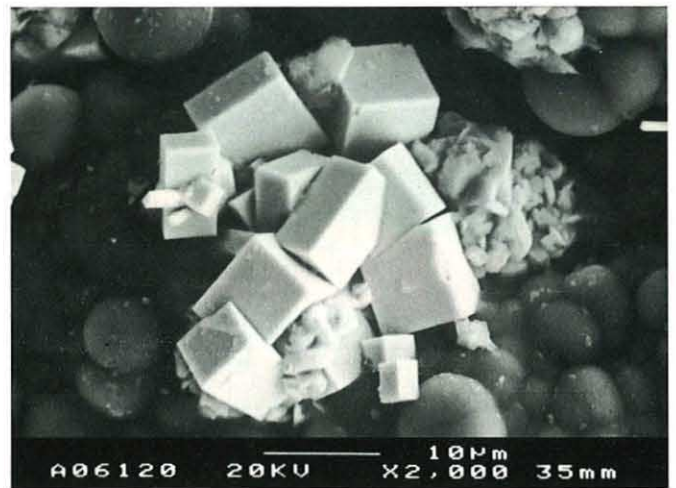


Abb. 9. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von silberführendem Galenit (bis 1 % Massenanteile Ag) in Verwachsung mit nicht-stöchiometrischen Pb-Ag Sulfosalzen (bis 14 % Massenanteile Ag).



Abb. 10a und b. Sulfid-Präzipitate („Mini-Mounds“) aus einem neuen Hydrothermalfeld in der Nähe der ASHES-Lokation („Pyrrhus Vents“). Während die Fluidkanäle mit hochtemperiert gebildetem Chalkopyrit ausgekleidet sind, bestehen die Außenbereiche aus Pyrit, Markasit und Sphalerit.

Tabelle 1. Gegenüberstellung goldreicher (1,1–3,8 ppm Au) und goldarmer (0,1–0,9 ppm Au) Hydrothermalpräzipitate des Axial Seamount. Die goldreichen Proben sind bei Temperaturen von $> 300\text{ °C}$ gebildet worden und im Gegensatz zu der goldarmen Probenpopulation hohen Pb-, As-, Sb-, Ag- und Cd-Gehalten gekennzeichnet. Dies ist auf eine gleichzeitige Kontrolle der Goldmineralisation durch die Stabilität des Gold-Bisulfidkomplexes $[\text{Au}(\text{HS})_2^-]$ zurückzuführen.

	high Au, low – T ($< 300\text{ °C}$)					low Au, high – T ($> 300\text{ °C}$)		
Au ppm	3.8	3.6	2.3	1.6	1.1	0.9	0.5	0.1
Cu wt. %	0.9	1.1	0.8	1.5	0.8	36.5	10.1	38.7
Zn	51.0	42.0	52.0	35.0	40.0	4.4	2.9	0.5
Pb ppm	935	993	967	1204	693	208	206	< 5
As	510	320	740	380	250	170	390	33
Sb	270	290	270	170	150	18	20	7
Ag	170	190	130	130	96	98	17	10
Cd	2072	1767	1398	1235	1559	127	73	32

geochemischen Charakterisierung dieses Materials hoffen wir einen Beitrag zu der momentan intensiv geführten Diskussion über das geochemische Verhalten von Silber in submarinen Hydrothermalsystemen leisten zu können. Das Auftreten von frischen Sulfidvererzungen in den Baryt-Chimneys des CASM-Feldes sowie der Nachweis von jungen Chalkopyrit-Bildungen an der Unterseite der Schichtlaven werden als Hinweise auf eine Aufheizung des Hydrothermalsystems gewertet.

Die Probenahme im Bereich des ASHES-Feldes erbrachte Massivsulfide aus einem Bereich, in dem bislang keine Sulfidmineralisationen bekannt waren. Bei dem Probenmaterial handelt es sich um sogenannte „Mini-Mounds“ (etwa $50 \times 30 \times 30\text{ cm}$) mit deutlich ausgebildeten Fluidkanälen, die ausnahmslos mit Hochtemperatur-

Chalkopyrit ausgekleidet sind (Abbildung 10). Weitere Sulfidphasen sind Pyrit, Markasit und Sphalerit, die mit Röhrenwürmern, Sulfidwürmern und anderer Ventfauna bewachsen sind. Das Auftreten dieses zum Teil hochtemperiert gebildeten Materials („Pyrrhus Vents“) in einem Bereich, in dem bislang nur diffuser Fluidaustritt bekannt war, deutet ebenfalls auf eine regionale Aufheizung des Systems „Axial Seamount“ hin.

Die geochemischen Analysen der Sulfide aus dem ASHES-Hydrothermalfeld lassen eine eindeutige Differenzierung in goldreiche und goldarme Vererzungen zu (Tabelle 1). Bei den goldreichen Vererzungen (1,1–3,8 g/t Au) handelt es sich im Gegensatz zu der goldarmen Mineralassoziation (0,1–0,9 g/t Au) ausschließlich um niedrigtemperiert gebildetes Material mit hohen Zn- und geringen Cu-Konzentrationen. Typisch sind hier gleichfalls niedrige Gehalte an Pb, As, Sb, Ag und Cd (substituiert für Fe in Sphalerit). Diese Elementvergesellschaftung belegt eine klare geochemische und damit auch mineralogische Kontrolle der Goldmineralisation, wobei das geochemische Verhalten des Goldes in diesem Milieu, d. h. bei Lösungstemperaturen unterhalb 300 °C, im Wesentlichen durch die Stabilität des Gold-Bisulfidkomplexes $[\text{Au}(\text{HS})_2^-]$ kontrolliert wird [7].

Die Ergebnisse der Schwefelisotopen-Untersuchungen an einigen ausgewählten Proben lassen für die Sulfide typische Werte von +2,1 bis +4,9 ‰ $\delta^{34}\text{S}$ erkennen, wobei die Sulfate erwartungsgemäß Werte zwischen +20 bis +21 ‰ $\delta^{34}\text{S}$ liefern (Tabelle 2). Der Durchschnittswert von +3,3 ‰ ($n = 12$) der Sulfide entspricht dem Mittelwert von +3,2 ‰ ($n = 461$) für Sulfide rezenter Hydrothermalsysteme an Mittelozeanischen Rücken [8] und signalisiert einen Anteil von etwa 85 % basaltischem Schwefel ($\delta^{34}\text{S} = 0$ ‰) und 15 % reduziertem Meerwasserschwefel ($\delta^{34}\text{S} = 21$ ‰).

5 ROPOS-Einsätze

Während des dritten Fahrtabschnitts der HYDROTRACE-Kampagne wurde der kanadische Tiefseeroboter ROPOS (Abbildung 11) erstmalig von FS Sonne aus erfolgreich für Arbeiten am Meeresboden eingesetzt (vgl. [9]). Im Verlaufe von zwei Tauchgängen mit insgesamt 20 h Einsatzzeit konnte bis-

her einzigartiges Probenmaterial aus dem Bereich des Inferno-Vents im ASHES-Hydrothermalfeld gewonnen werden. Bei Temperaturmessungen mit dem Tieftauchboot Alvin wurde hier 1996 eine Austrittstemperatur von 330 °C bestimmt. Wiederholungsmessungen mit Alvin im Jahre 1995 haben einen Anstieg der Fluidtemperaturen um 20 °C auf 348 °C ergeben – wiederum ein deutliches Zeichen für eine Aufheizung des Gesamtsystems, die möglicherweise mit einem bevorstehenden Megaplume-Ereignis in Zusammenhang steht.

Bemerkenswert im Hinblick auf die Fluidtemperaturen des Inferno-Vents (348 °C) ist, dass bei der Wassertiefe von 1500 m (entsprechend 150 bar oder 15 MPa) die Zweiphasengrenze des Meerwassers überschritten wird, d. h. der Druck von 150 bar reicht bei einer Lösungstemperatur von 348 °C nicht mehr aus, um eine Phasenseparation bzw. das Kochen der Hydrothermalflüssigkeit zu verhindern. Hiermit gehört Axial Seamount zu den ganz wenigen Tiefwasserhydrothermalsystemen der Welt, an denen *boiling* zu beobachten ist. Das Absieden der Hydrothermalen des Inferno-Vents konnte durch Videoaufnahmen von ROPOS in einer einzigartigen Weise dokumentiert werden (Abbildung 12).

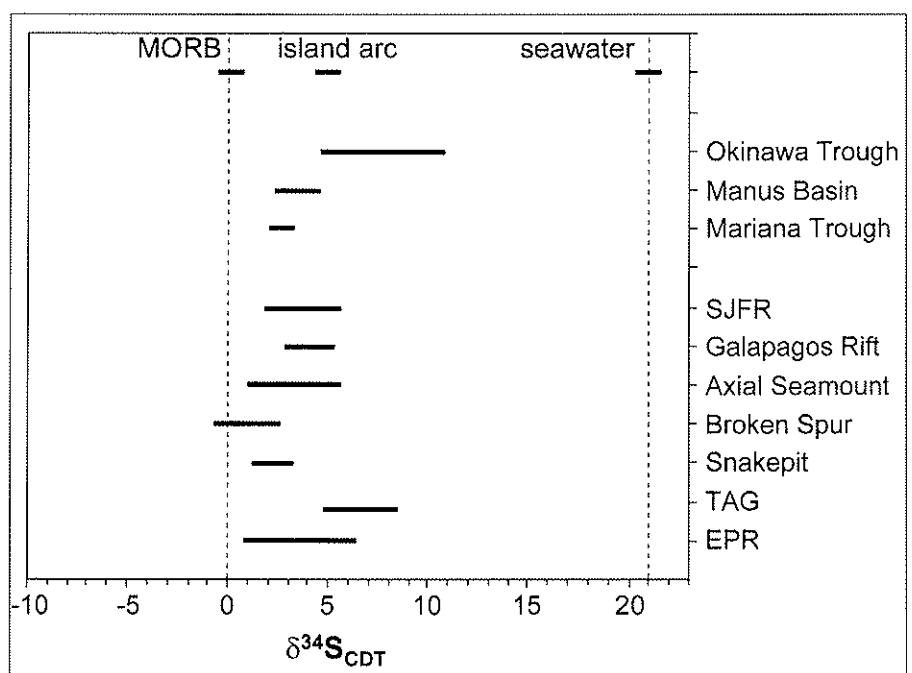
Durch die zentimetergenaue Manipulation des Gerätes war es darüber

hinaus möglich, die aus Hochtemperatur-Chalkopyrit und Anhydrit bestehende Spitze des Inferno-Schlotes im Detail zu beproben (Abbildung 13). Hiermit steht für unsere Untersuchungen einzigartiges Probenmaterial zur Verfügung, mit dem erstmals grundlegende Fragen der Element- und insbesondere der Edelmetallfraktionierung, der Fraktionierung von Schwefelisotopen sowie der Bildung von Flüssigkeitseinschlüssen in Zusammenhang mit Phasenseparation in submarinen Hydrothermalsystemen beantwortet werden können.

6 Ausblick

Mit dem Tiefseeroboter ROPOS wurde zweifelsohne eine neue Ära in der deutschen Meeresforschung begonnen. Die Verfügbarkeit eines ROV ist für die Zukunft eine unabdingbare Voraussetzung dafür, den eingeschlagenen Weg erfolgreich fortsetzen zu können. In Kombination mit der bewährten nationalen Forschungsschiff-Flotte und der wertvollen Erfahrung ihrer Besatzung kann ein ROV der deutschen Meeresforschung sowohl im geowissenschaftlichen als auch im biologischen und mikrobiologischen Bereich international zu einer Vorrangstellung verhelfen. In den letzten Jahrzehnten waren uns derartige Forschungserfolge im Gegensatz zu ame-

Tabelle 2. Schwefelisotopen-Verhältnisse submariner Massivsulfide aus Back-Arc-Riftzonen (Okinawa, Manus, Mariana) und Mittelozeanischen Rücken (SJFR = Southern Juan de Fuca Ridge, Galapagos, Broken Spur, Snakepit, TAG = Trans-Atlantic Geotravers, EPR = East Pacific Rise) im Vergleich zu den $\delta^{34}\text{S}$ -Werten der Sulfide des Axial Seamount.



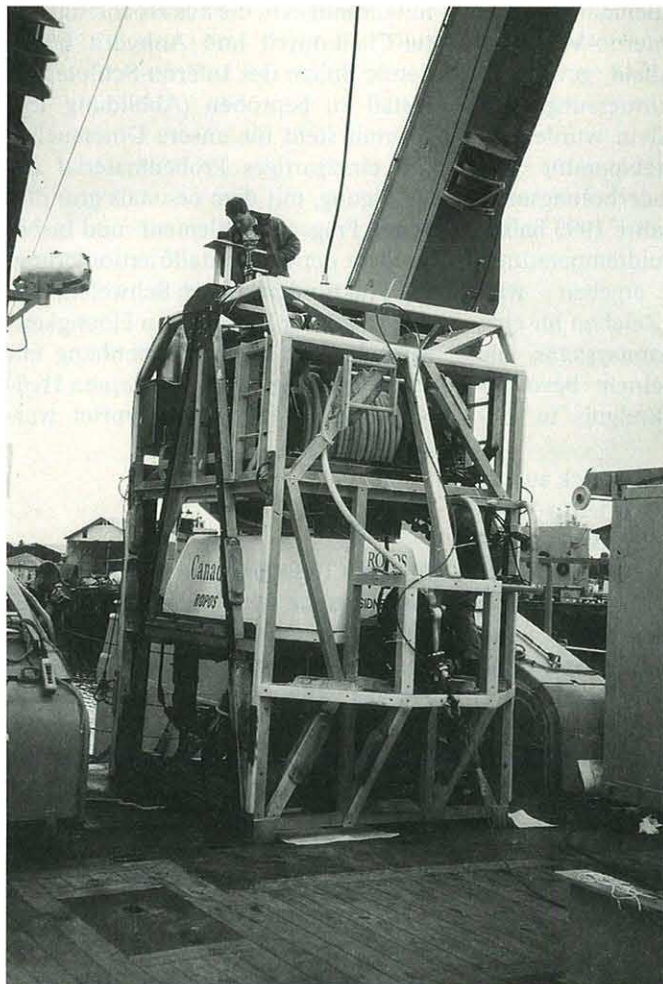


Abb. 11. Der kanadische Tiefseeroboter ROPOS auf dem Achterdeck des FS Sonne. Deutlich zu erkennen ist der Käfig, mit dem der Roboter über eine 300 m lange Nabelschnur verbunden ist.

Abb. 13. Spitze des Inferno-Vents, aus dem zur Zeit der Probenahme mit ROPOS kochende Hydrothermalfluide (348 °C) austraten (vgl. Abbildung 12). Der zentrale Fluidkanal besteht aus Hochtemperatur-Chalkopyrit, in den Außenzonen findet sich u. a. hochtemperiert gebildeter Anhydrit.



Abb. 12. Austritt kochender Hydrothermalfluide am Top des Inferno-Vent im ASHES-Hydrothermalfeld des Axial Seamount. Aufgrund der Wassertiefe von nur 1532 m (entsprechend etwa 150 bar) kommt es beim Austritt der 348 °C heißen Hydrothermalfluide des Inferno-Vents durch Überschreiten der Zweiphasengrenze des Meerwassers zur Phasenseparation, was zur Ausbildung einer schweißbrennerähnlichen „Flamme“ führt, die in dieser Art in marinen Hydrothermalsystemen noch nicht beobachtet wurde. Kopie eines Video-Standbildes der ROPOS-Aufzeichnungen am Axial Seamount.



rikanischen, kanadischen, französischen, japanischen und auch russischen Kollegen, die allesamt über moderne Tieftauchboote verfügen, weitgehend versagt. Das Zeitalter der ROV's wird es aber nun endlich erlauben, auch deutsche Meeresforscher in die Lage zu versetzen, Spitzenforschung am Meeresboden zu betreiben – und dies gegenüber den Tauchbooten mit erhöhter Effizienz bei gleichzeitig geringeren Kosten und dem Ausschluss jeglichen Restrisikos für Wissenschaftler und Techniker.

Danksagung

Die Durchführung des HYDROTRACE-Projektes und der erstmalige Einsatz eines ROV von Bord eines deutschen Forschungsschiffes aus war nur durch

das abgestimmte gemeinsame Vorgehen einer Reihe von Institutionen möglich, die zum Teil unbürokratisch daran mitgearbeitet haben, die formellen, technischen und nicht zuletzt finanziellen Voraussetzungen für dieses Vorhaben zu schaffen. Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) in Bonn für die Bereitstellung der Gesamtfinanzierung für dieses Vorhaben (Projekt 03G0109A,B,C), dem Projektträger Biologie, Energie und Ökologie des BMBF in Warnemünde für die administrative Begleitung des Projektes sowie der Reedereigemeinschaft Forschungsschiffahrt GmbH in Bremen für die Unterstützung bei den für den ROPOS-Einsatz notwendigen technischen Modifikationen des FS Sonne. Unseren Kollegen vom Geological Survey of

Canada in Ottawa danken wir für die kostenneutrale Bereitstellung des ROPOS-Systems zur Untersuchungen der Hydrothermalquellen des Axial Seamount und den Wissenschaftlern und Technikern von NOAA Seattle und Newport für ihre uneingeschränkte Hilfestellung. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover hat die Koordination des Vorhabens mit den kanadischen Partnern aus Mitteln des BMBF für deutsch-kanadische Kooperation (WTZ) gefördert. Nicht zuletzt gilt unser Dank allen übrigen beteiligten Wissenschaftlern und Technikern, insbesondere den ROPOS-Piloten sowie der nautischen und seemannischen Besatzung des FS Sonne für ihren Einsatz und Enthusiasmus, der letztendlich dieses Unternehmen zum Erfolg geführt hat.

Literatur

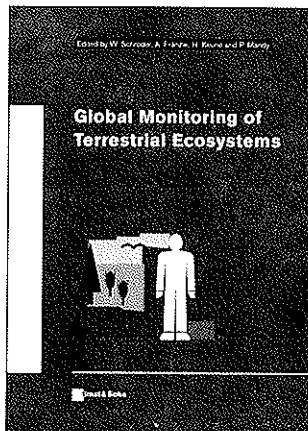
- [1] P. Herzig, E. Suess & P. Linke (Hrsg.): RV Sonne Cruise Report SO109 – HYDROTRACE. GEOMAR Report 58, 1997, 250 S.
- [2] P. Herzig, E. Suess, P. Linke, R. W. Embley, M. D. Hannington et al.: Hydrothermal activity and rift-induced tracers at Axial Seamount (Juan de Fuca Ridge): results of cruise SO-109 of R/V Sonne – ROPOS; *InterRidge News* 6/1 (1997) 35–38.
- [3] Sonderband Axial Seamount. *J. Geophys. Res.* 95, B8 (1990) 12689–12966.
- [4] Selected Papers on „The 1993 volcanic eruption on the CoAxial segment, Juan de Fuca Ridge“; *Geophys. Res. Lett.* 22/2 (1995) 129–182.
- [5] D. Butterfield, G. J. Massoth, R. E. McDuff, J. E. Lupton & M. D. Lilley: Geochemistry of hydrothermal fluids from Axial Seamount hydrothermal emissions study vent field, Juan de Fuca Ridge: subseafloor boiling and subsequent fluid-rock interaction; *J. Geophys. Res.* 95, B8 (1990) 12895–12921.
- [6] Freiberg University, GEOMAR, Geological Survey of Canada and NOAA: Hydro-sweep Bathymetry of Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge based on cruise 50–109 of the R/V Sonne; Geological Survey of Canada, Open File 3422 (1996) scales 1:75 000 and 1:25 000.
- [7] P. Herzig, M. D. Hannington, Y. Fouquet, U. von Stackelberg & S. Petersen: Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back-arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific; *Econ. Geol.* 88 (1993) 2182–2209.
- [8] P. Herzig, S. Petersen & M. D. Hannington: Geochemistry and sulfur isotopic composition of the TAG hydrothermal mound, Mid-Atlantic Ridge, 26° N. In: P. Herzig, S. Humphris & J. Miller: *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, 158 (im Druck).
- [9] P. Linke, E. Suess & P. Herzig: Der Einsatz des Tiefseeroboters ROPOS auf FS Sonne; *Geowissenschaften* 15 (1997) S. 181–184.

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr. Peter Herzig, Lehrstuhl für Lagerstättenlehre, Institut für Mineralogie, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Brennhaugasse 14, D-09596 Freiberg.

Prof. Dr. Erwin Suess, Dr. Peter Linke, GEOMAR Forschungszentrum für marine Geowissenschaften, Wischhofstraße 8, D-24148 Kiel.

Global Monitoring of Terrestrial Ecosystems



Editors: H. Keune, A. Fränze, W. Schröder and P. Mandy
1996. 296 pages with 555 Illustrations.
Format: 17 x 24 cm.
Hb. DM 128,-/öS 947,-/sFr 120,-
ISBN 3-433-01533-3

This English language publication is based on the proceedings of the workshop „Environmental Monitoring“ that took place in Munich in June, 1994. It was organized by HEM (Harmonization of Environmental Measurement Office), a division of the UN environmental programme.

The book presents both the foundations of a worldwide system of environmental monitoring and the basis for harmonizing and achieving comparability of results. It also suggests a concept for the installation of such an earthscanning system.

Readers will find the names of workshop participants as well as a list of existing monitoring systems in the appendices.

Ernst & Sohn
Verlag für Architektur
und technische Wissenschaften GmbH
Mühlenstraße 33-34, D-13187 Berlin
Tel. (030) 478 89-284
Fax (030) 478 89-240
A Member of the VCH Publishing Group

Ernst & Sohn